

УДК 622.841

<https://doi.org/10.33271/crpnmu/64.055>© І.О. Садовенко¹, В.І. Бондаренко¹, І.А. Салєєв², А.М. Загриценко¹¹ Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна² ТОВ «ДТЕК Енерго», Київ, Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ГІДРОГЕОМЕХАНІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ВОДОРЕГУЛЮВАННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ШАХТНИХ СТОВБУРІВ ПРИ ЗАКРИТТІ ШАХТ

© I. Sadovenko¹, V. Bondarenko¹, I. Salieiev², A. Zagrytsenko¹¹ Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine² DTEK Energy LLC, Kyiv, Ukraine

SUBSTANTINATION OF HYDROMECHANICAL PARAMETERS OF WATER REGULATION USING MINE PILLARS DURING MINES CLOSURE

Мета. Обґрунтування гідрогеомеханічних параметрів, що дозволяють контролювати безпечне співвідношення гідродинамічних рівнів у шахтному стовбурі і гірському масиві, при закритті шахт з використанням занурювальних насосів.

Методика дослідження. Використаний експериментально-аналітичний метод, що полягає у формуванні та аналізі даних натурних випробувань тріщинної пористості, проникності та положення рівнів підземних вод у міцних пісковиках навколо шахтних стовбурів з бетонним кріпленням.

Результати дослідження. Встановлено, що гідрогеомеханічний стан навколо шахтного стовбура у стійких водовмісних породах характеризується розвитком взаємо конкуруючих процесів нелінійного зменшення проникності навантаженого породного контуру та гідрогеомеханічного розвантаження структурних елементів водовмісних порід і фільтруючого кріплення. Величини гідрогеомеханічного розвантаження кріплення стовбура в межах $0,054 - 6,12 \cdot 10^5$ Па близькі до міцності на розтягування контакту «бетон – водовмісна порода», що свідчить про небезпеку його руйнування.

Наукова новизна. вирішена задача суміщення пружного вісесиметричного навантаження кріплення породним масивом та гідродинамічною площинно-радіальною течією до стовбура, де гідрогеомеханічний стан у стійких водовмісних породах характеризується розвитком взаємо конкуруючих процесів нелінійного зменшення проникності навантаженого породного контуру та гідростатичного розвантаження структурних елементів водовмісних порід і фільтруючого кріплення.

Практичне значення. Отримані рішення та їх аналіз пояснюють відому з практичного досвіду невідповідність розрахункових (нормативних) навантажень на кріплення реально виміряним величинам, а також мають суттєве практичне значення. Встановлений факт наближення величини гідрогеомеханічного розвантаження кріплення стовбура до міцності на розтягування контакту «бетон – водовмісна порода» є небезпечним і потребує зменшення гідродинамічного ухилу до шахтного стовбура при управлінні процесом затоплення шахт занурювальними насосами.

Ключові слова: шахтний стовбур, бетонне кріплення, затоплення, фільтрація, гідрогеомеханічні процеси, міцність.

Вступ. В існуючих науково-практичних розробках щодо врахування фільтраційних процесів при веденні і згортанні гірничих робіт виділяють чотири основні напрями: гідрогеологічне прогнозування водопритоків [1], оцінка зони формування водопровідних тріщин з точки зору безпеки гірничих робіт [2], прогнозування і врахування гідродинамічних процесів навколо виробок [3], розробка технологічних заходів водорегулювання при веденні і згортанні гірничих робіт [4, 5].

При веденні гірничих робіт системами управління покрівлею з повним обваленням над виробленим простором формуються водопровідні тріщини, нормально нашаруванню, що активно з ним пов'язані. Вироблений простір, який заповнений обваленими породами, і зона водопровідних тріщин в період експлуатації залишаються практично повністю здренованими. Водопритоки в шахту в загальному випадку формуються за рахунок поверхневого водоносного комплексу, що приурочений до покривних відкладень і зони підвищеної тріщинуватості верхньої частини вуглевмісної товщі [6].

Напружений стан масиву водонасичених зон визначається дією на породний скелет об'ємних гравітаційних, гідростатичних і гідродинамічних сил. Ефективне напруження в породному скелеті можна виразити за відомою формулою К. Терцагі:

$$\sigma_e = \sigma_n - \sigma_h,$$

де σ_n – повне напруження, що відповідає вазі стовпа водонасичених порід і зовнішнім силам, що діють на масив (зокрема – тектонічним силам); σ_h – нейтральне напруження, що відповідає гідростатичному тиску в розрахунковій точці.

В роботі [7] викладені фізико-математичної основи та особливості програмної реалізації моделі руху шахтних вод в програмі Vox Model, що застосовується у практичних прогнозах німецької компанії DMT при плануванні водного менеджменту закритих шахт Європи.

Існує досвід [8, 9] управління потоками підземних та шахтних вод в техногенно порушеному породному масиві при підтриманні гідродинамічно та екологічно безпечного рівня шахтних вод стосовно умов Фінляндії та кам'яновугільного басейну Руру в Німеччині, останній є подібним за певними геолого-гірничотехнічними показниками до регіону Донбасу.

Проте у наведених джерелах не представлені методики вирішення науково-практичного завдання, що виникає у разі водорегулювання рівневого режиму при згортанні гірничих робіт у системі «шахтний стовбур – підроблений породний масив, що затоплюється». Актуальність і деталізація цього питання полягає в тому, що зміна гідродинамічного режиму у масиві шахтного поля при затопленні та водорегулюванні, наприклад, занурювальними насосами у шахтному стовбурі, викликає суттєві зміни гідрогеомеханічного навантаження на кріплення, яке найчастіше є бетонним. Отже, *мета роботи* полягає в обґрунтуванні гідрогеомеханічних параметрів, що дозволяють контролювати безпечне співвідношення гідродинамічних рівнів у шахтному стовбурі і гірському масиві, при закритті шахт з використанням занурювальних насосів.

Методика та результати досліджень. Уявлення про механізм формування навантаження на кріплення гірничих виробок у стійких водоносних породах суперечливі і не відображають суті гідрогеомеханічних процесів, що відбуваються в системі «кріплення – бокові породи». Цьому сприяє формальне використання спрощених гідродинамічних схем фільтрації води для гірничих виробок.

Вплив факторів гірського тиску навколо контурів вертикальних шахтних стовбурів на фільтраційні властивості водоносних тріщинуватих порід, а також шляхи використання встановлених закономірностей при оцінці динаміки гідрогеомеханічного навантаження кріплення досліджено експериментально-аналітично.

Для цього зіставлені та проаналізовані фактичні дані щодо розкритості тріщин в гірничих породах з їх фільтраційними параметрами за матеріалами контрольно-стовбурового буріння по декількох шахтах Красноармійського району Донбасу (ВО «Укрвуглегеологія»). Дисперсію коефіцієнту фільтрації водоносних пісковиків ілюструє рис. 1, де візуально видно та доведено методом рангової кореляції відсутність тренду між фільтраційними властивостями та глибиною при рівні значущості близько 0,05. Результат не узгоджується з відомим твердженням про закономірність зменшення розкритості тріщин в гірничих виробках зі збільшенням глибини залягання тріщинуватих порід.

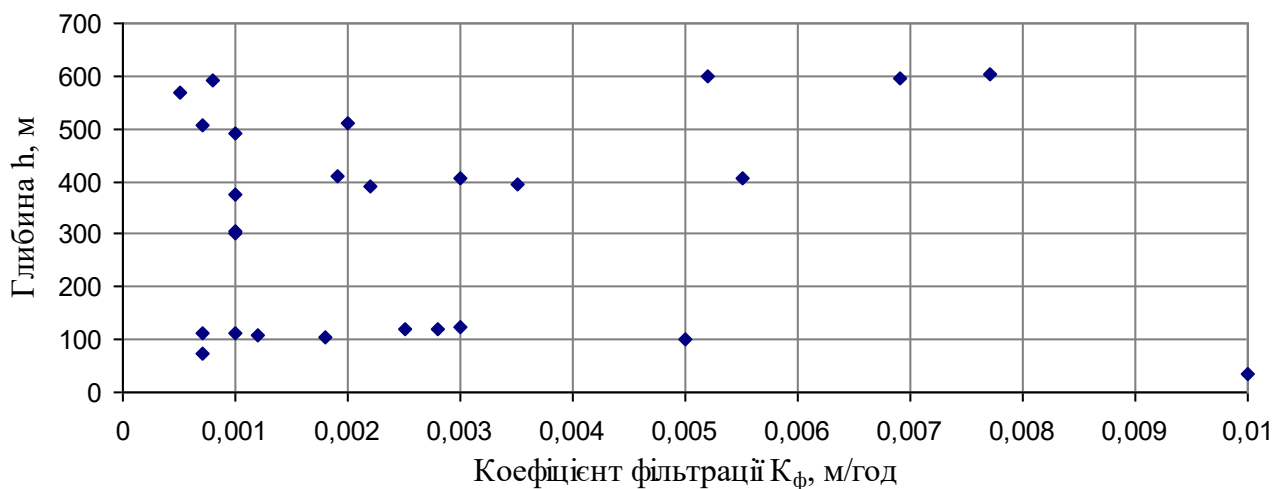


Рис. 1. Дисперсія значень коефіцієнта фільтрації (K_f) водоносних пісковиків в залежності від глибини (h) за результатами пластовипробувань в розвідувальних свердловинах

Зокрема, це підтверджують графіки зміни розкритості тріщин з глибиною (рис. 2). Судячи з закономірностей про зміну проникності тріщинуватих масивів гірських порід (Ромм Є.С.), слід очікувати зменшення коефіцієнту фільтрації на 1 – 2 порядки при зменшенні розкритості тріщин навіть з урахуванням похибки вимірювання проникності пластовипробувачем. В такій ситуації важливо знайти вірне тлумачення цьому протиріччю, і на думку авторів воно полягає в наступному.

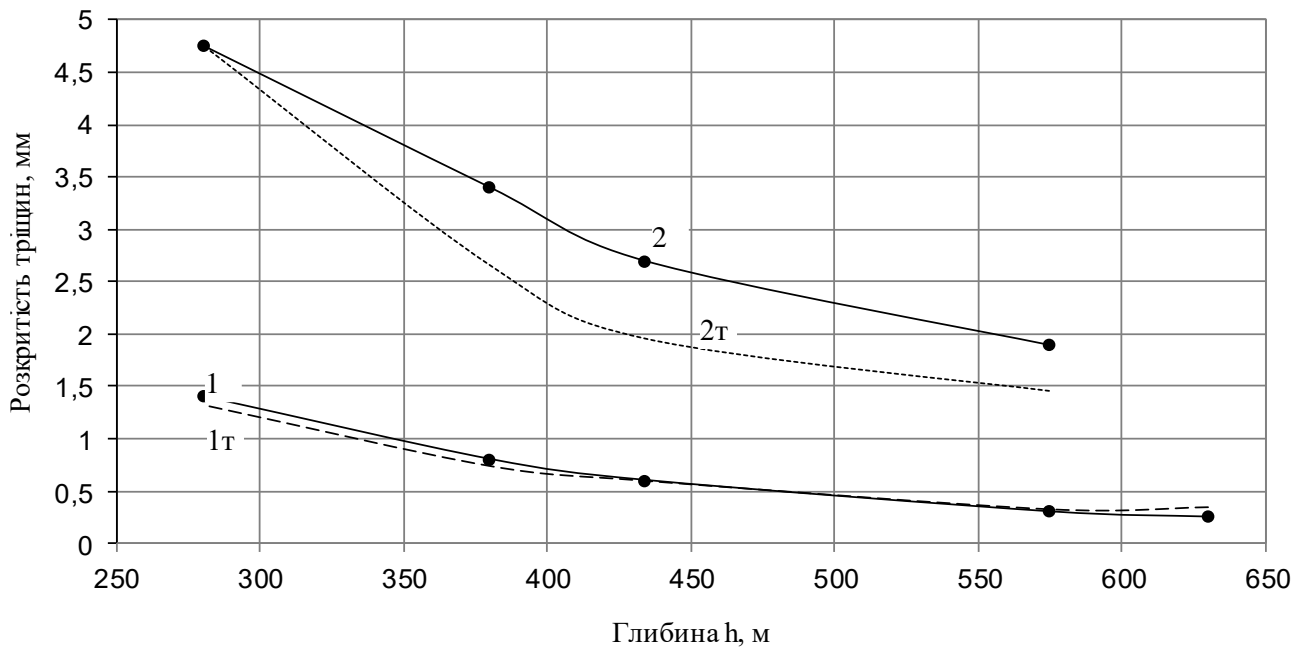


Рис. 2. Зміна розкритості тріщин (δ_T) з глибиною (h) в пластах пісковиків:
 1, 2 – за результатами вимірювань в гірничих виробках Красноармійського району Донбасу (центральна та південна, північна групи шахт, відповідно);
 1т, 2т – розрахункове значення за формулою (1)

Контур гірничої виробки у стійких тріщинуватих породах сприймає напруження та пружні деформації стискання і залежить від глибини залягання шару порід, що розглядається. Ці твердження правомочні, оскільки водовмісні породи представлені мілкозернистими пісковиками з міцністю на одновісне стискання не менше $300 \cdot 10^5$ Па, а тектонічна будова району не сприяє появі значних відхилень від геостатичного поля напружень, що визначається вагою товщі гірських порід.

Якщо врахувати відомі положення щодо наближення напруженого стану внутрішнього контуру гірничих виробок до одновісного стискання, а також те, що більша частина пружних деформацій порід реалізується практично незалежно від технології кріплення гірничих виробок, очевидна тенденція зменшення розкритості тріщин, що відображають графіки на рис. 2. Свердловина контрольно-стовбурового буріння має розміри, що відрізняються більш ніж на порядок від розмірів шахтного стовбура, і не вносить значного збурення в полі напружень тріщинуватого масиву гірських порід. Співвідношення найбільш розповсюджених лінійних елементів дискретного гірського масиву і свердловини діаметром до 0,2 м далеко від умов, коли проявляються властивості суцільності. Тому, спираючись на експериментально підтверджену стабілізацію проникності гірських порід в умовах близьких до рівномірного об'ємного стискання, припустимо, що закономірна зміна проникності порід за результатами пластовипробувань в свердловинах можлива лише за рахунок природного зменшення активної пористості. За результатами вимірювань, представлених на рис. 1, тренд не фіксується,

ймовірно, за недостатнього інтервалу глибин. Внаслідок цього контрастно виділяється тенденція до закриття тріщин з глибиною за рахунок факторів гірського тиску (рис. 2).

В розвитку цього висновку перетворена формула К.В. Руппенейта, що описує зближення країв тріщин в зразку гірської породи при одновісному стисканні.

З урахуванням вказаних положень щодо концентрації напружень на породному контурі шахтного стовбура формула набуває вигляду

$$\delta_{Ti} = \delta_{T0} \left[1 - \frac{2\gamma(h_i - h_0)}{\phi E_{II} + 2\gamma(h_i - h_0)} \right], \quad (1)$$

де δ_{Ti} , δ_{T0} – розкриття тріщин відповідно на глибині h_i і мінімальній h_0 , де фіксується розкритість тріщин (див. графіки на рис. 2); γ – середньозважене значення об'ємної ваги гірських порід, що визначає геостатичне навантаження на глибині h_i ; E_{II} – модуль деформації тріщинуватої гірської породи; ϕ – відношення площі скальних контактів в тріщинах до загальної площі поверхні тріщин, що для розрахунків приймають 0,0003 (Руппенейт К.В.)

Криві 1т і 2т на рис. 2 показують отримане розрахункове зближення країв тріщин у водовмісній породі відносно фактично виміряних величин на графіках 1 і 2. При цьому значення інших параметрів по Красноармійському району прийнято $\gamma = 2,4 \text{ т/м}^3$; $E_{II} = 250 \cdot 10^8 \text{ Па}$.

Стандартна похибка розрахункових величин розкритості тріщин відносно фактичних складає 11,4%, тобто при довірчій ймовірності 0,95 відхилення не перебільшить 22,8%.

З простежених закономірностей впливають важливі прикладні висновки, які враховують особливості взаємодії кріплення і бокових порід. А саме, розрахункове значення коефіцієнту фільтрації, що входить до формул з оцінки водоприпусків в шахтний стовбур і визначення навантаження на кріплення, можна обґрунтовано знизити в n^2 разів. При цьому варто врахувати, що має місце співвідношення

$$n = \frac{\delta_p}{\delta_{Ti}}, \quad (2)$$

де δ_p , δ_{Ti} – розкриття тріщин у водоносній гірській породі за даними фотометричних або гідродинамічних досліджень в свердловині та розраховане за формулою (1), відповідно. Вимога щодо забезпечення надійності розрахункового коефіцієнту фільтрації вибором нижньої межі відомого діапазону залежності проникності тріщин від розкритості за квадратичним законом (Бер Я та ін.) дозволяє у дослідженому районі Донбасу для розрахунків користуватися безпосередньо даними рис. 2.

Отримані результати важливо враховувати при обґрунтуванні механізму формування навантажень на кріплення при закритті шахт. За розрахунковими формулами в діючих нормативах [10] навантаження на кріплення визначають

арифметичною сумою тиску породного масиву та гідравлічної складової. Врахування двох складових пояснюється складністю встановлення контакту та наступною взаємодією кріплення з гірськими породами. Розрахунки гідравлічної складової, які виконані при проектуванні вертикальних стовбурів шахти ім. Героїв Космосу в Західному Донбасі та шахти «Україна» в Красноармійському районі показали, що в місцях перетину окремих шарів водоносних пісковиків необхідно використовувати бетонне кріплення товщиною 1,0 м і більше, для глибин, що переважають 300 м. Розрахункові величини коефіцієнтів фільтрації і напорів у водоносних горизонтах склали, відповідно, $3,57 - 53,5 \cdot 10^{-3}$ м/год і 325 – 556 м (за даними контрольно-стовбурового буріння та випробування ВО «Укрвуглегеологія»).

Оцінимо основні аспекти існуючих уявлень щодо навантаження кріплення вертикальних стовбурів у стійких водоносних породах та обґрунтуємо розрахункові залежності, які за думкою авторів, найбільш досконало відображають механізм формування навантажень.

Більшість відомих рішень з розрахунку навантажень і зміщення фільтруючого кріплення ґрунтуються на аналізі впливу об'ємної гідравлічної сили в безкінечно малому елементі масиву порід і кріплення (Рюмін О.М. та ін.). Різниця в напруженнях на поверхні елементів є аналогічною зміні гідравлічного ухилу за лінійним законом фільтрації. Незважаючи на зайву формалізацію окремих рішень, необхідно зауважити, що принципово помилкових положень при реалізації такого підходу немає. Проте правомірність його використання для багатьох випадків взаємодії «кріплення – гірська порода» недостатня. Так розрахункова величина остаточного напору за кріпленням не враховує перехід з напірного в безнапірний режим фільтрації і навпаки.

Лабораторні експерименти показують, що при відношенні товщини кріплення до потужності водоносного горизонту $<0,1$ та напорі $>0,1$ МПа, фільтрація через кріплення має вигляд просочування, а функція напорів на контакті з кріпленням зазнає розриву. Наведені співвідношення охоплюють весь діапазон умов, що зустрічається на практиці.

Експериментальні заміри навантаження на кріплення в обводнених пісковиках виконані в головному стовбурі шахти «Західно-Донбаська» за допомогою породних п'єзометрів та динамічних балонів, заповнених трансформаторним маслом або бітумом (Дробишев В.М. та ін.). Зафіксовані величини тиску і показники п'єзометрів розцінені як відповідні навантаження на кріплення стовбура, що досягають величини гідростатичного напору за кріпленням при досить рівномірному розподілі епюр навантаження на зовнішньому контурі кріплення. Така оцінка викликає сумніви, бо і п'єзометр, і динамометричне кріплення конструктивно здатні відреагувати та прирівнятися з гідравлічним тиском в одній чи декількох контактуючих тріщинах породного масиву. Подібний механізм передачі навантаження був штучно створений за кріпленням водонепроникної металічної обичайки, що призвело до руйнування кріплення в Красноармійському районі (шахта «Красноармійська-Капітальна»).

Наведена інформація свідчить про те, що ототожнення гідравлічного навантаження на кріплення у водонасичених стійких породах з величиною остаточного напору за кріпленням спотворює реальний механізм навантаження. У зв'язку з цим, гідравлічна складова навантаження кріплення визначається наступним чином

$$P_r = \gamma_e H_k [n_{II}(1 - n_k) + n_k], \quad (3)$$

де γ_e – об'ємна вага води, H_k – остаточний напір за кріпленням; n_{II} та n_k – пористість водовмісних порід та кріплення, відповідно. Формула (3) задовольняє граничним умовам, коли при $n_k \rightarrow 0$, $P_r \rightarrow \gamma_e H_k n_{II}$ і при $n_{II} \rightarrow 1$, $P_r \rightarrow \gamma_e H_k$, а також пояснює обставини, коли рідко розташовані тріщини в породі, яка контактує з кріпленням, не можуть гідравлічно її навантажити до величин, що визначаються об'ємним аналізом сил.

Відомі положення теорії зважування визначають часткове розвантаження скелету водовмісних порід в умовах напірного режиму фільтрації навколо шахтного стовбура. В динаміці цього процесу можна виділити дві фази:

- формування гідравлічної депресії при проходці, кріпленні та експлуатації стовбура у водоносних породах зі зниженням рівня на величину природного напору за рахунок інтенсивного дренажу пристовбурової зони;
- згладжування гідравлічної депресії при відновленні рівня за кріпленням у процесі затоплення шахтного поля.

Друга фаза протікає в умовах сформованого контакту кріплення та гірських порід, що дозволяє оцінити пружну передачу навантажень породним контуром в першій та другій фазах. У породному кільці (рис. 3), що обмежений радіусом гідравлічної депресії R_e і зовнішнім радіусом бетонного кільця кріплення r_c , справедливі співвідношення для компонент напружень σ_z , σ_θ і переміщень U_z , що викликані гідрогеомеханічним градієнтом з ухилом до стовбура, у вигляді сполучення лінійного співвідношення підземної гідростатики і вісесиметричного розподілу напружень в пружному середовищі справедливі рівняння

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= \frac{E_{II}}{1 - \nu_{II}} A + \frac{E_{II}}{(1 + \nu_{II}) r^2} B - \frac{1}{2(1 - \nu_{II})} \left(D \ln r + D \frac{1 - 2\nu_{II}}{2} + C \right); \\ \sigma_\theta &= \frac{E_{II}}{1 - \nu_{II}} A - \frac{E_{II}}{(1 + \nu_{II}) r^2} B - \frac{1}{2(1 - \nu_{II})} \left(D \ln r - D \frac{1 - 2\nu_{II}}{2} + C \right); \\ U_z &= A_z + \frac{B}{r} - \frac{(1 - 2\nu_{II}) r}{4(1 - \nu_{II}) G_{II}} \left(D \ln r - \frac{D}{2} + C \right), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

де r – поточна координата між R_e і r_c ; E_{II} , G_{II} , ν_{II} – відповідно модуль деформації, модуль зсуву і коефіцієнт Пуассона для водовмісної гірської породи; A , B – постійні, що визначаються з граничних умов рівності компонент напружень гідростатичному тиску на контакті «кріплення – гірська порода» та їх відсутності на внутрішній поверхні стовбура; C і D – постійні величини, що визначаються зміною напору H навколо стовбура.

Напір визначається за законом

$$H = C + D \ln r, \quad (5)$$

який є загальним рішенням рівняння плоско-радіальної фільтрації вигляду

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dH}{dr} \right) = 0.$$

Граничні умови для визначення постійних C і D в даній постановці задачі $H = H_e$ при $r = R_e$; $H = H_k$ при $r = r_c$. Відповідно маємо

$$D = \frac{H_e - H_k}{\ln \frac{R_e}{r_c}}, \quad (6)$$

$$C = -\frac{(H_e - H_k) \ln r_c}{\ln \frac{R_e}{r_c}} + H_k, \quad (7)$$

де H_e та H_k – напір водоносного пласта в природних умовах та закріпний напір, знижений фільтрацією через кріплення, відповідно.

Гідростатичне зважування на окружності R_e сягає максимуму, при цьому

$$\sigma_r = \sigma_\theta = -\gamma_e H_e. \quad (8)$$

Якщо прирівняти радіальні зміщення навантаженого бетонного кільця з радіусами r_c та r_0 (рис. 3) по Г. Ламе і пружні зміщення породного контуру, то сумісним рішенням рівнянь (4, 5, 6 – 8) отримаємо вираз для розрахунку гідростатичного зважування P_p в кріпленні

$$P_p \cong \frac{\frac{\gamma_e H_k r_c}{E_{II}} \left(\frac{0,375}{\ln(R_e/r_c)} + 1,2 \right)}{1,2 r_c \left[\frac{0,6 r_c^2 / r_0^2 + 1}{E_k (r_c^2 / r_0^2 - 1)} + \frac{r_c \cdot a_p}{E_{II}} \right]}, \quad (9)$$

де E_k – модуль деформації бетонного кріплення; a_p – коефіцієнт, що дорівнює оберненій одиниці довжини, r_0 – внутрішній радіус бетонного кільця.

Зміну режиму фільтрації при переході з водоносного горизонту в проникне кріплення стовбура можна врахувати, якщо прирівняти витрати води за формулами Дюпюї та Дарсі. З цього випливає

$$H_k = \frac{K_\phi H_e}{K_\phi + \frac{K_k r_c \ln(R_e/r_c)}{r_c - r_0}}, \quad (10)$$

де K_ϕ та K_k – відповідно, коефіцієнт фільтрації водовмісних порід та кріплення.

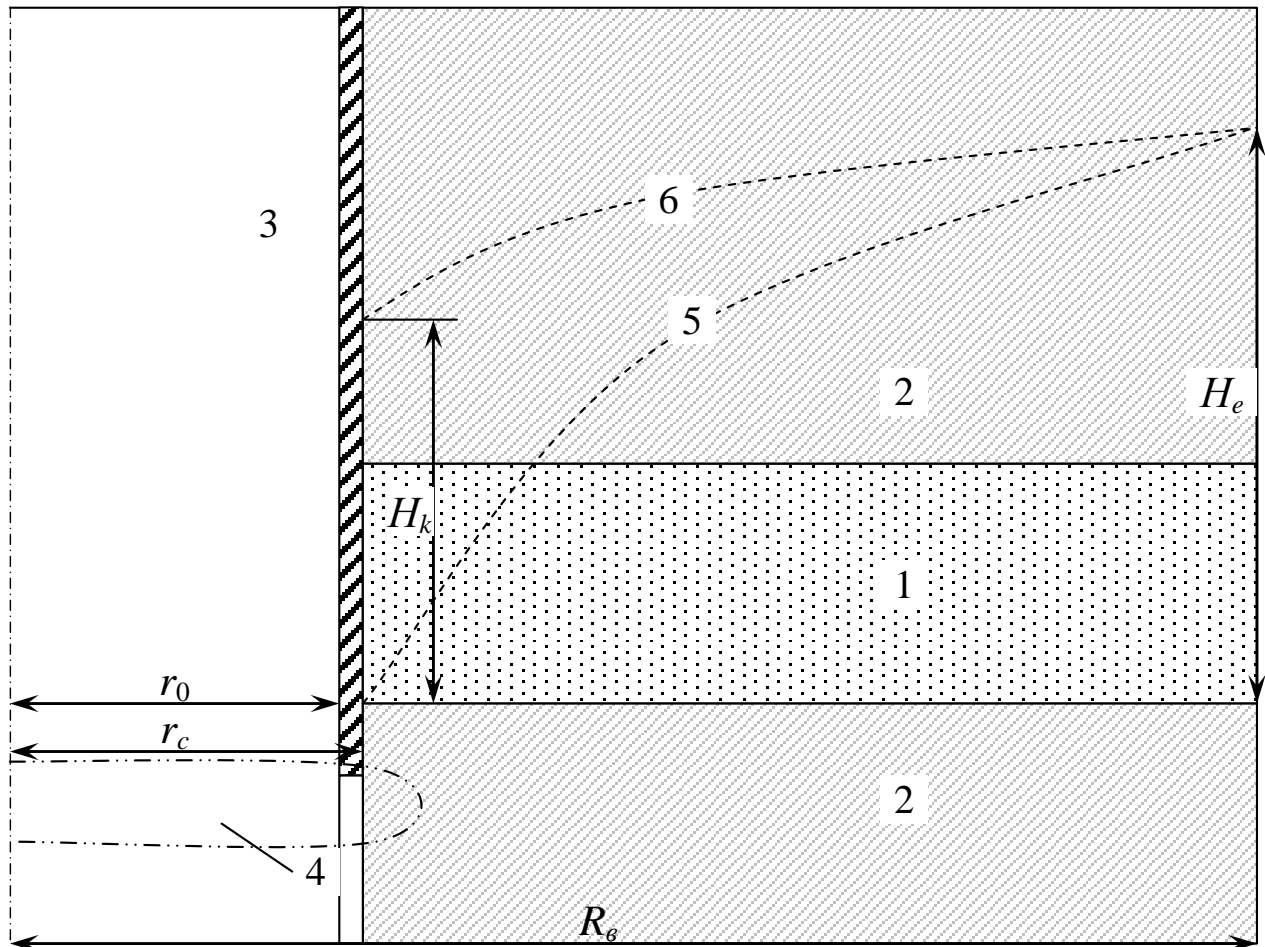


Рис. 3. Схема до рішення задачі про гідростатичне зважування кріплення шахтного стовбура: 1, 2 – відповідно, водоносна та водотривка гірська порода; 3 – бетонне кріплення; 4 – зона інтенсивного дренажу при експлуатації шахти; 5, 6 – положення депресійних кривих, відповідно, при експлуатації та закритті шахти

Закріпний напір, що розрахований за формулою (10), має більше значення, ніж нормативне і узгоджується з тим фактом, що експериментальні заміри і контрольно-стовбурове опробування діючих стовбурів практично не зафіксували зниження рівнів у порівнянні з доексплуатаційним.

Вплив різних параметрів (табл. 1) на величину гідростатичного зважування водопроникного кріплення проілюстровано на рис. 4. Криві 1 – 5 порівняні з відомими уявленнями про механізм напружено-деформованого стану системи «кріплення – бокові породи». Криві 6 – 8, де простежується асимптотичне зниження гідростатичного зважування кріплення при збільшенні радіусу гідралічної депресії R_6 , на перший погляд суперечать фізичному змісту. Проте, якщо врахувати характер гідродинамічної депресії поблизу шахтного стовбура (вирази 5 – 7), то спостерігається більш інтенсивна зміна рівня у пристовбуровій зоні за менших значень R_6 .

Таблиця 1

Параметри для розрахунку гідростатичного зважування

Номер кривої	H_k , м	R_g , м	$E_{II} \cdot 10^{-8}$, Па	$E_k \cdot 10^{-8}$, Па
1	600	200	400	—
2	600	200	400	—
3	400	200	400	—
4	200	200	400	—
5	200	200	600	—
6	50	—	200	200
7	400	—	400	100
8	400	—	400	200

Якщо пружне геомеханічне збурення від проведення стовбура затухає на відстані $\sim 10r_c$, то об'єм гідростатично зважених гірських порід збільшується в цій зоні за менших R_g .

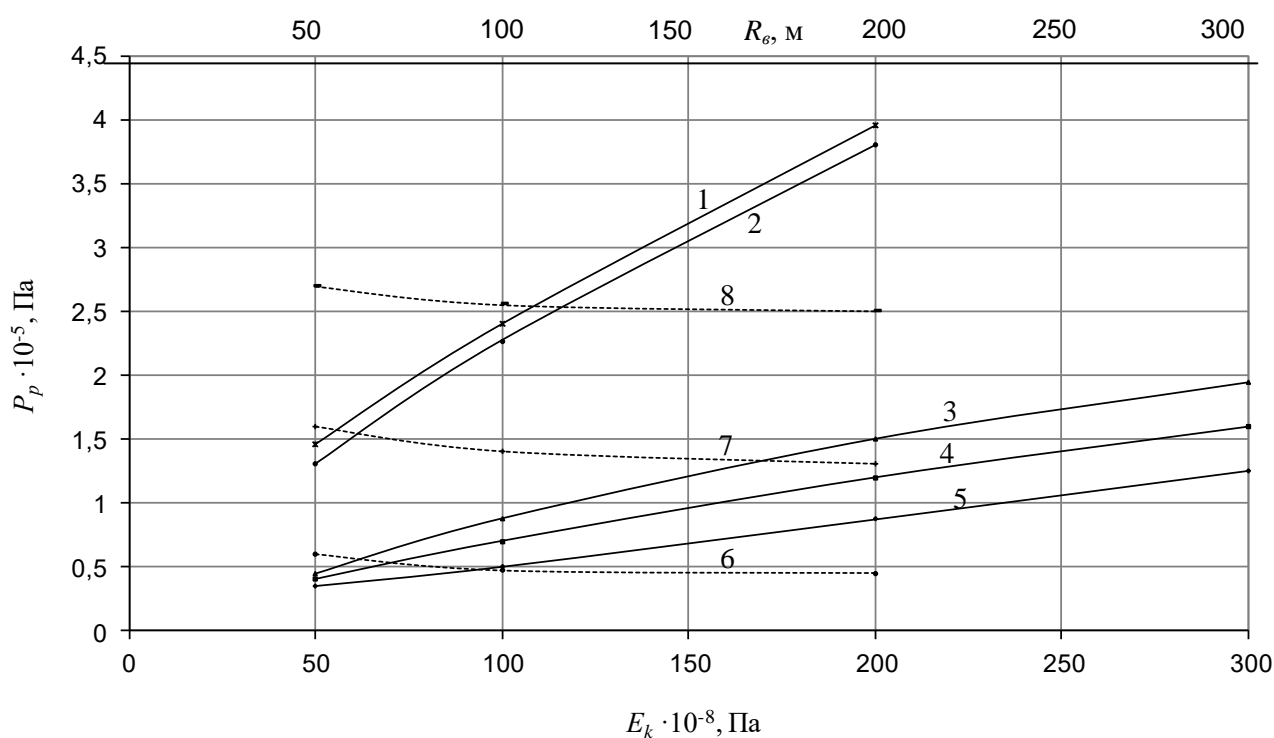


Рис. 4. Залежність величини гідростатичного зважування бетонного кріплення P_p від розрахункових параметрів E_k (1 – 5) та R_g (6 – 8) при $r_c = 4,5$ м, $r_0 = 4,0$ м

Чисельним аналізом формули (10) отримані значення гідрогеомеханічного зважування при фільтрації через бетонне кріплення $0,054 \cdot 10^5 - 6,12 \cdot 10^5$ Па в межах доцільного діапазону параметрів: $H_k = 50 - 600$ м, $R_g = 25 - 300$ м, $r_c = 4,5$ м, $r_0 = 4,0$ м; $\nu_{II} = 0,1 - 0,4$; $\nu_k = 0,1 - 0,5$; $E_{II} = 50 \cdot 10^8$; $E_k = 10 \cdot 10^8 - 300 \cdot 10^8$ Па.

Отримане рішення пояснює факти невідповідності розрахункових навантажень на кріплення реально діючим, а також має важливий прикладний аспект.

Величини гідростатичного зважування бетонного кріплення в діапазоні $0,054 - 6,12 \cdot 10^5$ Па близькі до міцності на розрив контакту «бетон – гірська порода», що необхідно враховувати при водозниженні з використанням занурювальних насосів.

Висновки. Експериментально-аналітичним методом вирішена задача суміщення пружного вісесиметричного навантаження кріплення породним масивом та гідродинамічною площинно-радіальною течією до стовбура. Гідрогеомеханічний стан навколо шахтного стовбура у стійких водовмісних породах характеризується розвитком взаємо конкуруючих процесів нелінійного зменшення проникності навантаженого породного контуру та гідростатичного розвантаження структурних елементів водовмісних порід і фільтруючого кріплення.

Встановлені закономірності пояснюють причини невідповідності розрахункових (нормативних) навантажень на кріплення реально вимірним величинам, а також мають суттєве практичне значення. Величини гідрогеомеханічного розвантаження кріплення стовбура в межах $0,054 - 6,12 \cdot 10^5$ Па близькі до міцності на розтягування контакту «бетон – водовмісна порода». Цей факт є небезпечним і потребує зменшення гідродинамічного ухилу до шахтного стовбура при управлінні процесом затоплення шахт занурювальними насосами. Створення гідроізолюючих шарів на шляху руху підземних вод призводить до збільшення гідростатичного тиску на кріплення і збільшує небезпеку руйнування контакту «бетон – водовмісна порода».

Перелік посилань

1. Норватов Ю.А., Савельев Д.И., & Яшина А.В. (2014). Гидрогеологическое обеспечение горных работ при разработке угольных месторождений подземным способом. *Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал)*, (8), 23-28.
2. Newman C., Agioutantis Z., Boede G., & Leon J. (2017) Assessment of potential impacts to surface and subsurface water bodies due to long wall mining. *International Journal of Mining Science and Technology*, 27(1), 57-64.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.11.016>.
3. Слащева О.А. (2019). Вплив води на стійкість гірничих виробок. *Геотехнічна механіка. Міжвідомчий збірник наукових праць*, 148. 144-152
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/201910900092>
4. Нургалиев Е. И., & Майоров А.Е. (2018). Технологические схемы возведения монолитных изоляционных сооружений горных выработок угольных шахт. *Уголь*, (11 (1112)), 10-17.
5. Борщевский С.В., Лабинский К.Н., & Галечко С.Ю. (2007). К вопросу о повышении механических свойств и гидростойкости бетонной крепи. *Наука и прогресс транспорта. Вестник Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта*, (17), 195-201.
6. Норватов Ю.А., & Петрова И.Б. (2010). Гидрогеомеханические процессы при затоплении шахт. *Записки Горного института*, 185, 231-234.
7. Eckart, M. (2011). *BoxModel Concept: ReacFlow3D. Modelling of the flow of mine water and groundwater, mass and heat transport*. DMT GmbH & Co. KG, Essen, Germany.
8. *Guidelines for mine water management (2016)*. VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, Geological Survey of Finland (GTK), Finnish Environment Institute.
<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/technology/2016/T266.pdf>

9. Kessler, T., Mugova, E., Jasnowski-Peters, H., Rinder, T., Stemke, M., Wolkersdorfer, C., Hilberg, S., Melchers, C., Struckmeier, W., Wieber, G., & Schafmeister, M.-T. (2020). Grundwasser in ehemaligen deutschen Steinkohlenrevieren – ein wissenschaftlicher Blickwinkel auf Grubenflutungen. *Grundwasser*, 25(4), 259–272.
<https://doi.org/10.1007/s00767-020-00460-0>
10. СНиП II-94-80. *Нормы проектирования. Подземные горные выработки* (1982). Стройиздат.

АННОТАЦИЯ

Цель. Обоснование гидромеханических параметров, которые позволяют контролировать безопасное соотношение гидродинамических уровней в шахтном стволе и горном массиве при закрытии шахт с использованием погружных насосов.

Методика исследования. Использован экспериментально-аналитический метод, который заключается в формировании и анализе данных натурных испытаний трещиноватой пористости, проницаемости и положения уровней подземных вод в крепких песчаниках вокруг шахтных стволов с бетонным креплением.

Результаты исследования. Установлено, что гидромеханическое состояние вокруг шахтного ствола в устойчивых водовмещающих породах характеризуется развитием взаимно конкурирующих процессов нелинейного уменьшения проницаемости нагруженного породного контура и гидрогеомеханической разгрузки структурных элементов водовмещающих пород и фильтрующего крепления. Величины гидрогеомеханической разгрузки крепления ствола в пределах $0,054 - 6,12 \cdot 10^5$ Па близкие к пределу крепости на растяжение контакта «бетон – водовмещающая порода», что свидетельствует про опасность его обрушения.

Научная новизна. Решена задача совмещения упругой висесимметрической нагрузки крепления породного массива и гидродинамического плоскостно-радиального течения к стволу, где гидрогеомеханическое состояние в устойчивых водовмещающих породах характеризуется развитием взаимно конкурирующих процессов нелинейного уменьшения проницаемости нагруженного породного контура и гидростатической разгрузки структурных элементов водовмещающих пород и фильтрующего крепления.

Практическое значение. Полученные решения и их анализ объясняют известную из практического опыта несоответственность расчетных (нормативных) нагрузок на крепление реально измеримым величинам, а также имеют существенное практическое значение. Установленный факт приближения величины гидрогеомеханической разгрузки крепления ствола к пределу прочности на растягивание контакта «бетон – водовмещающая порода» является опасным и требует уменьшения гидродинамического отклонения к шахтному стволу при управлении процессом затопления шахт погружными насосами.

Ключевые слова: шахтный ствол, бетонное крепление, затопление, фильтрация, гидрогеомеханические процессы, прочность.

ABSTRACT

Purpose. Substantiation of hydromechanical parameters that make it possible to control the safe ratio of hydrodynamic levels in a mine shaft and a rock mass when closing mines using submersible pumps.

Research methodology. An experimental-analytical method was used, which consists in the formation and analysis of data from field tests of fractured porosity, permeability and the position of groundwater levels in hard sandstones around mine shafts with concrete support.

Research results. It has been established that the hydromechanical state around a mine shaft in stable water-bearing rocks is characterized by the development of mutually competing processes of nonlinear decrease in the permeability of the loaded rock contour and hydrogeomechanical unloading of structural elements of water-bearing rocks and filter attachment. The values of the hydrogeomechanical unloading of the shaft attachment in the range of 0.054 - 6.125105 Pa are close to the tensile strength limit of the "concrete-water-bearing rock" contact, which indicates the danger of its collapse.

Scientific novelty. The problem of combining the elastic viscometric load of the rock mass attachment and the hydrodynamic planar-radial flow to the wellbore is solved, where the hydrogeomechanical state in stable water-bearing rocks is characterized by the development of mutually competing processes of nonlinear decrease in the permeability of the loaded rock contour and hydrostatic unloading of structural elements of the water-bearing rocks and filters.

Practical value. The obtained solutions and their analysis explain the discrepancy between the calculated (standard) loads on the fastening, which is known from practical experience, and actually measurable values, and also have significant practical significance. The established fact of the approximation of the value of hydrogeomechanical unloading of the stovol attachment to the tensile strength of the contact "concrete - water-bearing rock" is dubious and requires a decrease in the hydrodynamic deflection to the mine stovol when controlling the process of flooding with submersible pumps.

Keywords: *mine shaft, concrete fastening, flooding, filtration, hydrogeomechanical processes, strength.*